

Dr hab. inż. Grażyna Mrówka – Nowotnik prof. PRz  
Katedra Nauki o Materiałach  
Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa  
Politechnika Rzeszowska  
Al. Powstańców Warszawy 12  
35-959 Rzeszów

Rzeszów, 15.10.2024r

## RECENZJA

Rozprawy doktorskiej

mgr inż. **Mariusza Lewandowskiego**

pt. **„Wpływ parametrów odlewania i obróbki cieplnej na kształtowanie struktury i właściwości mechanicznych odlewów ciśnieniowych bloku silnika samochodowego”**

### 1. Podstawa opracowania

Podstawą opracowania recenzji jest pismo (nr **RDIMa.512.5.2024 RM**) Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej, Pana prof. dr. hab. inż. **Adama Grajcara** z dnia 26.09.2024r informującego, że Rada Dyscypliny powołała mnie na recenzenta pracy doktorskiej mgr inż. Mariusza Lewandowskiego, w przewodzie prowadzonym w dyscyplinie „Inżynieria Materiałowa”. Dokumentację otrzymałam w dniu 30.09.2024 r.

### 2. Charakterystyka i układ rozprawy

Opiniowana rozprawa doktorska pt.: **„Wpływ parametrów odlewania i obróbki cieplnej na kształtowanie struktury i właściwości mechanicznych odlewów ciśnieniowych bloku silnika samochodowego”** zrealizowana została we współpracy z firmą Nemark Polska w ramach programu „doktorat wdrożeniowy” pod opieką naukową dr hab. inż. Andrzeja Kielbusa, prof. PŚ. Dotyczy doboru parametrów technologicznych procesu odlewania ciśnieniowego oraz obróbki cieplnej T5 na właściwości i mikrostrukturę odlewów bloku silnika samochodowego z podeutektycznego stopu aluminium EN AC-46000 (AlSi9Cu3(Fe)). W pracy Autor podjął się także zaprojektowania i wdrożenia innowacyjnego systemu podciśnieniowego dozowania ciekłego stopu, zwiększającego jakość odlewów i uzyskanie wymaganego poziomu właściwości mechanicznych. Po lekturze pracy można pokusić się o stwierdzenie, że praca w pewnych obszarach jest interdyscyplinarna i wpisuje się zarówno w dyscyplinę naukową inżynieria materiałowa, jak

również inżynieria mechaniczna. Jednak wiele jej aspektów sprawia, że bez wątpliwości można ją przypisać do dyscypliny inżynieria materiałowa. Treść recenzowanej pracy łączy aspekty naukowe z bardziej praktyczną analizą wynikającą z potrzeb firmy, w której została zrealizowana. Stwierdzam jednak, że zdecydowany ciężar pracy przeniesiono na część technologiczną. Wynika to z pewnością z potrzeb firmy Nemark Polska do której wyniki pracy wniosą duży wkład w rozwój stosowanej w niej technologii.

Praca napisana jest w języku polskim składa się z 10 rozdziałów, obejmuje 101 stron ilustrowanych 82 rysunkami i 18 tabelami. Układ pracy jest klasyczny i składa się z dwóch zasadniczych części: pierwszej opartej na przeglądzie literatury oraz drugiej - doświadczalnej, zakończonej podsumowaniem i wnioskami. Na końcu pracy znajduje się bibliografia oraz streszczenie pracy w języku polskim i angielskim. Bibliografia zawiera 80 pozycji literaturowych w dostatecznym stopniu charakteryzujących aktualny stan wiedzy w zakresie tematyki rozprawy. Większość przywoływanych prac powstała w okresie ostatnich kilku lat, co potwierdza aktualność podjętego przez Doktoranta tematu. W mojej opinii, jakkolwiek zawarty w pracy przegląd literatury jest właściwy, to mógłby być jednak rozszerzony, co z pewnością wpłynęłoby na lepszy poziom części pracy opartej na przeglądzie literatury.

### **3. Ocena celowości i aktualności tematyki badawczej**

Współczesne trendy na światowych rynkach motoryzacyjnych silnie koncentrują się na zrównoważonym rozwoju, a jednym z kluczowych aspektów tej transformacji jest zwiększenie efektywności energetycznej i redukcja emisji gazów cieplarnianych. W odpowiedzi na te wyzwania, producenci coraz częściej sięgają po odlewy ciśnieniowe ze stopów aluminium, zwłaszcza w produkcji komponentów o krytycznym znaczeniu, takich jak obudowy układów napędowych czy bloki silników samochodowych. Aluminium, dzięki swojej niskiej masie i dobrym właściwościom mechanicznym, umożliwia tworzenie lżejszych i bardziej wydajnych jednostek napędowych, co w bezpośredni sposób przyczynia się do poprawy osiągnięć pojazdów oraz obniżenia zużycia paliwa.

Jednym z kluczowych czynników wpływających na jakość odlewów ciśnieniowych jest optymalizacja parametrów odlewania oraz odpowiednia obróbka cieplna, które mają bezpośredni wpływ na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne gotowego produktu. W przypadku odlewów bloku silnika samochodowego, szczególnie ważne jest uzyskanie mikrostruktury o jednorodnym rozmieszczeniu faz międzymetalicznych oraz minimalizacji porowatości, co ma bezpośredni wpływ na wyższą wytrzymałość, wydajność oraz bezpieczeństwo i trwałość pojazdów w eksploatacji.

W obliczu globalnych trendów, które promują zrównoważony rozwój, efektywność energetyczną oraz minimalizację śladu węglowego, technologie te stają się nie tylko istotne z punktu widzenia inżynierii materiałowej, ale również niezbędne dla przemysłu motoryzacyjnego na całym świecie. Dlatego uważam, że tematyka recenzowanej pracy doktorskiej podjęta przez pana mgr inż. Mariusza Lewandowskiego jest bardzo ważna i aktualna, dotyczy współczesnych wyzwań technicznych i technologicznych, a także atrakcyjna zarówno z naukowego jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Doktorant jasno przedstawił problem badawczy, tezę i cele pracy, zaproponował koncepcję jego rozwiązania i wdrożenia.

## 4. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

### 4.1. Ocena aktualnego stanu wiedzy

Studium literatury wprowadzające w zagadnienia związane z tematyką rozprawy doktorskiej mgr inż. Mariusz Lewandowski zawarł w dwóch pierwszych rozdziałach pracy. W rozdziale „1 Wprowadzenie” Doktorant przedstawił krótką historię technologii odlewania ciśnieniowego oraz zagadnienia dotyczące produkcji elementów konstrukcji samochodowych metodami odlewniczymi, głównie odlewania ciśnieniowego. Zaprezentował trendy badawcze i obszary sektora motoryzacyjnego wymagające ciągłego doskonalenia, zwłaszcza w produkcji wielkogabarytowych odlewów dla przemysłu motoryzacyjnego. Przedstawił kierunki rozwoju tej technologii na przykładzie wiodących w tym sektorze firm, takich jak np. Ford czy Tesla oraz potrzeby zmian w procesie technologicznym wytwarzania komponentów konstrukcji samochodowych wymuszone przez dyrektywy unijne i inne organizacje światowe. Na końcu rozdziału w sposób syntetyczny uzasadnił wybór tematu swojej pracy doktorskiej, wynikający przede wszystkim z potrzeby firmy Nemark, w której praca była realizowana, a rezultaty badań zostały wdrożone.

W rozdziale drugim („2 Przegląd literatury”) Doktorant dokonał przeglądu literatury pod kątem charakterystyki maszyn stosowanych w odlewnictwie ciśnieniowym. Przedstawił krótki zarys historyczny tej technologii odlewania oraz jej rozwój na przestrzeni lat, skupiając uwagę na współczesnym jej zastosowaniu, zwłaszcza w przemyśle motoryzacyjnym. Przedstawił znaczenie odlewnictwa ciśnieniowego w produkcji wielkogabarytowych, zintegrowanych elementów konstrukcji pojazdów samochodowych, scharakteryzował proces odlewania ciśnieniowego, wskazując wady i zalety tego procesu, w porównaniu do konwencjonalnych metod odlewania, zwłaszcza odlewania grawitacyjnego. Omówił kryteria klasyfikacji technologii odlewania ciśnieniowego oraz bardzo dokładnie opisał zagadnienia dotyczące maszyn odlewniczych z gorącą oraz zimną komorą wtrysku, stosowanych najczęściej do odlewania ciśnieniowego w przemyśle motoryzacyjnym oraz stosowane systemy dozowania ciekłego stopu. Następnie krótko opisał stopy aluminium stosowane w odlewnictwie ciśnieniowym, szczególną uwagę poświęcając charakterystyce stopu aluminium EN AC-46000 (AlSi9Cu3(Fe)), stanowiącego przedmiot badań w Jego pracy.

Część pracy opartą na przeglądzie literatury oceniam najslabiej (Podrozdział 2.3), ponieważ brakuje jej głębszej analizy i krytycznego naukowego podejścia do zagadnień omawianych w pracy. Zamiast rzetelnej syntezy dostępnych badań, autor ograniczył się do technologicznego przedstawienia maszyn ciśnieniowych oraz systemów dozowania ciekłego stopu do maszyn zimnokomorowych. Przede wszystkim Doktorant bardzo powierzchownie potraktował zagadnienia dotyczące stopów aluminium stosowanych w odlewnictwie ciśnieniowym, a w szczególności charakterystyki materiału do badań – odlewniczego stopu aluminium EN AC-46000 (AlSi9Cu3(Fe)). Ponadto, brakuje omówienia najnowszych osiągnięć w dziedzinie, co sprawia, że przegląd wydaje się niekompletny. Zdecydowanie poszerzenie tej części pracy pozwoliłoby lepiej osadzić badania własne w kontekście istniejącej wiedzy i wyraźnie wskazać luki, które praca ma wypełnić. Taka analiza znacznie wzbogaciłaby pracę i nadała jej naukowy wymiar.

## 4.2. Ocena tezy oraz celów i zakresu pracy

Doktorant, zanim sformułował tezę i cele pracy, w rozdziale trzecim „3 *Geneza problemu*” przedstawił obszary produkcji firmy Nemark Polska, która jest zaliczana do czołowych światowych producentów, specjalizujących się w technologii odlewania wysokociśnieniowego (HPDC) elementów konstrukcyjnych dla przemysłu samochodowego tj.: nowoczesne bloki silników, obudowy układów napędowych, komponenty pojazdów elektrycznych (korpusy silników, obudowy baterii) oraz odlewy strukturalne (ramy konstrukcyjne, elementy podwozia). Nemark Polska jest jednym z 16-stu oddziałów firmy Nemark umiejscowionych w różnych częściach świata i jest odpowiedzialna m.in. za implementację do produkcji seryjnej opracowanych procesów technologicznych wysokociśnieniowego odlewania. W ostatnich latach firma Nemark Polska została wybrana przez Klienta z branży motoryzacyjnej do opracowania technologii odlewania wysokociśnieniowego i produkcji seryjnej obudowy korpusu (bloku) silnika spalinowego z podeutektycznego stopu aluminium EN AC-46000 (AlSi9Cu3(Fe)). Klient oczekiwał rozwiązania dwóch problemów, tj. zwiększenia minimalnego udziału złomu obiegowego (własnego), który będzie wykorzystywany w produkcji seryjnej do 60-70% oraz zwiększenia właściwości mechanicznych w określonych strefach odlewu  $R_m = 210$  MPa i  $A_5 \geq 1\%$ . Skuteczne wdrożenie projektu do produkcji wymagało analizy wpływu dodatku złomu obiegowego na właściwości uzyskanych odlewów oraz zastosowania technologii redukującej potencjalny negatywny wpływ tego czynnika.

Następnie, w rozdziale „4 *Analiza stanu faktycznego*”, Doktorant dokonał oceny i analizy dotychczas stosowanego w firmie Nemark Polska procesu produkcyjnego odlewów wysokociśnieniowych bloku silnika samochodowego. Przeanalizował proces, poczynając od dostawy ciekłego stopu, kończąc na pobieraniu przez automatyczną łyżkę zalewową i jego transporcie do komory strzałowej odlewniczej maszyny wysokociśnieniowej. Wskazał, że podczas całego procesu produkcyjnego wiele parametrów odlewania wysokociśnieniowego jest w firmie Nemark Polska ściśle monitorowanych i weryfikowanych zgodnie z obowiązującymi normami i procedurami wewnętrznymi. Kontrola właściwości mechanicznych odlewów oraz wyznaczonych parametrów procesowych nadzorowanych w czasie rzeczywistym przez system kontroli, a także ich archiwizacja pozwoliła Doktorantowi zestawić dane z ostatnich kilku lat (2017-2019). Na podstawie tych danych ustalił, że stosowane dotychczas parametry procesu nie zapewniają powtarzalności właściwości mechanicznych, jednak pozwoliły zdefiniować, które z rejestrowanych parametrów są stabilne podczas procesu produkcyjnego, a które nie. Na tej podstawie Doktorant opracował uproszczony model nowego procesu produkcyjnego i wskazał dwa kluczowe etapy w procesie produkcyjnym, które powinny zapewnić stabilne, powtarzalne właściwości zgodne z oczekiwaniami Klienta tj. poprawa jakości ciekłego stopu, poprzez jego odpowiednie przygotowanie w piecu do topienia (ilość złomu obiegowego) oraz pobieranie ciekłego stopu z pieca podgrzewczego zintegrowanego z maszyną wysokociśnieniową (odpowiedni poziom ciekłego stopu w piecu). Na podstawie zebranych danych Doktorant sprecyzował trzy etapy pracy eksperymentalnej tj.: „ocena wpływu złomu obiegowego na strukturę i właściwości stopu, opracowanie zmian konstrukcyjnych/technologicznych oraz eksperymenty przemysłowe”.

Na podstawie studium literatury, analizy monitorowanych w firmie Nemark Polska danych z ostatnich kilku lat oraz wyników wstępnych badań własnych Autor sformułował tezę pracy (rozd. „5 *Teza, cele pracy*”): „*Odpowiednio dobrane parametry technologiczne ciekłego stopu*”

*AlSi9Cu3(Fe) w piecu podgrzewczym zintegrowanym z maszyną wysokociśnieniową mają istotny wpływ na strukturę i poprawę właściwości mechanicznych wysokociśnieniowych odlewów korpusów silników spalinowych."*

Dla udowodnienia której przyjął trzy cele pracy:

*„Cel naukowy: określenie wpływu złomu obiegowego w ciekłym stopie (20% i 70%) na strukturę i właściwości odlewów ciśnieniowych ze stopu AlSi9Cu3(Fe).*

- Cel technologiczny: określenie wpływu zmiany poziomu ciekłego stopu w piecu podgrzewczym przy maszynie odlewniczej na właściwości wytrzymałościowe oraz mikrostrukturę odlewów wysokociśnieniowych.*
- Cel konstrukcyjny: zastosowanie innowacyjnego rozwiązania konstrukcyjno-technologicznego zwiększającego jakość odlewów poprzez redukcję wpływu ciężkich pierwiastków stopowych (głównie ołów)."*

Dla udowodnienia postawionej tezy Doktorant przyjął plan badawczy, który podzielił na trzy etapy, co pozwoliło mu na bieżąco weryfikować czynniki determinujące jakość otrzymanych odlewów oraz ustalić parametry wymagające skorygowania, w celu uzyskania dobrej jakości odlewów spełniających wymagania Klienta.

W pierwszym etapie zaplanował ocenę wpływu skrajnych ilości złomu obiegowego w ciekłym stopie (20% i 70%) na jakość odlewów. Natomiast celem drugiego etapu było określenie wpływu zmiany poziomu ciekłego stopu w piecu podgrzewczym przy maszynie odlewniczej na mikrostrukturę oraz właściwości mechaniczne odlewów wysokociśnieniowych. W ramach 1-go i 2-go etapu przeprowadził badania indeksu gęstości ciekłego stopu, oraz analizę składu chemicznego, obserwacje mikrostruktury (LM, SEM) oraz statyczną próbę rozciągania na próbkach pobranych z odlanych elementów. Na podstawie wyników badań uzyskanych w ramach realizacji etapu 1 i 2 zdefiniował parametry brzegowe umożliwiające wykonanie odlewów wysokociśnieniowych ze stopu EN AC-46000 AlSi9Cu3(Fe) spełniających założone wymagania Klienta. W trzecim etapie zaplanował wdrożenie przygotowanego rozwiązania (oraz jego weryfikację w odlewaniu seryjnym stopu o maksymalnym udziale złomu obiegowego (70%). Dla otrzymanych odlewów wykonał analizę składu chemicznego stopu oraz weryfikację właściwości mechanicznych.

Podsumowując stwierdzam, że teza i cele pracy są dobrze zdefiniowane, odpowiadają głównym założeniom projektu i jasno definiują kierunek badań zmierzający do realizacji dobrze zaplanowanego planu badawczego, a przede wszystkim pozyskania wiedzy niezbędnej dla praktyki przemysłowej przedsiębiorstwa Nemark Polska.

#### **4.3. Ocena uzyskanych wyników badań i ich dyskusji**

Zasadnicze wyniki badań mgr inż. Mariusz Lewandowski zawarł w rozdziale 8 swojej pracy. Zaprezentował je chronologicznie, zgodnie z przyjętym planem badawczym. Na wstępie przedstawił wyniki badań dla dwóch wytopów różniących się zawartością złomu obiegowego – 20 % oraz 70 % (maksymalny udział, wymagany przez Klienta dla nowego produktu) resztę stanowił ciekły stop dostarczony przez dostawcę zewnętrznego. Wyniki badań otrzymane w pierwszym etapie pozwoliły Doktorantowi stwierdzić, że ilość złomu obiegowego nie ma zasadniczego wpływu na skład chemiczny otrzymanych odlewów. Skład chemiczny próbek pobranych z pieca do topienia oraz pieca podtrzymującego maszyny odlewniczej nie różnił się znacząco pomiędzy wytopami.

Wyniki badań właściwości mechanicznych dla dwóch wytopów różniących się zawartością złomu obiegowego wyznaczone w próbie stycznej rozciągania przedstawił w formie tabel i wykresów. Wykazał, że podobnie jak w przypadku składu chemicznego, zawartość złomu obiegowego (20 i 70%) nie wpływa na właściwości mechaniczne odlewów bloku silnika samochodowego, co najprawdopodobniej jest efektem wysokiej jakości złomu, który pochodzi wyłącznie z produkcji własnej - firmy Nemark Polska. Ponadto wykazał, że stopy z obydwu wytopów osiągnęły nieco wyższe właściwości wytrzymałościowe i plastyczne od nowych wymagań stawianych przez Klienta, tj.  $R_m = 210 \text{ MPa}$   $A_5 = 1,0 \%$ .

Dodatkowo dla grupy odlewów wysokociśnieniowych zawierających 70% złomu obiegowego przeprowadził obróbkę cieplną wg wymagań Klienta, osiągając stan T5. Nie zaobserwował zmiany wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  odlewów poddanych obróbce cieplnej T5, nastąpiło natomiast niewielkie obniżenie właściwości plastycznych -  $A_5$ .

Zastanawia mnie dlaczego Autor ograniczył badania właściwości mechanicznych tylko do tych dwóch parametrów ( $R_m$  oraz  $A_5$ ), gdyż w tej samej próbie, bez ponoszenia dodatkowej pracy i kosztów mógł wyznaczyć chociażby umowną granicę plastyczności  $R_{p0.2}$ . Nawet jeżeli Klient nie był zainteresowany tymi wynikami, to zamieszczenie ich w pracy wzbogaciłoby dane materiałowe badanego stopu  $\text{AlSi9Cu3(Fe)}$ .

Pierwszy etap badań pozostawia duży niedosyt w zakresie analizy mikrostruktury oraz identyfikacji składników fazowych mikrostruktury analizę mikrostruktury badanego stopu  $\text{AlSi9Cu3(Fe)}$  z dodatkiem złomu obiegowego w ilości 20% i 70%. Analizę mikrostruktury oraz identyfikację składników fazowych mikrostruktury Autor przeprowadził na mikroskopie świetlnym oraz skaningowym mikroskopie elektronowym – w połączeniu z punktową analizą składu chemicznego (EDS). Niestety analizę punktową składników fazowych mikrostruktury ograniczył tylko do przedstawienia wyników jakościowych - widma promieniowania rentgenowskiego EDS. Przecież mikroskop wyposażony w przystawkę EDS, oprócz danych jakościowych – pierwiastków wchodzących w skład wydzielen - podaje również wyniki ilościowe - zawartość pierwiastków w %mas i % at. Wyniki te ułatwiłoby poprawną identyfikację składników fazowych mikrostruktury w stopie. Ponadto do pełnej analizy powinien włączyć jeszcze inne metody badawcze, jak np. badania rentgenograficzne XRD. Natomiast Doktorant ograniczył się do wskazania jakie pierwiastki wchodzi w skład wydzielen i na podstawie porównania z danymi literaturowymi stwierdził, że *„Jest to najprawdopodobniej faza  $\theta\text{-Al}_2\text{Cu}$ ”, „Jest to prawdopodobnie faza  $\text{Al}_5\text{Mg}_8\text{Cu}_2\text{Si}_5$  [71]” czy „...najprawdopodobniej wskazuje, że mogą być to odpowiednio fazy  $\alpha\text{-Al}_{15}(\text{Fe},\text{Mn})_3\text{Si}_2$  oraz  $\beta\text{-Al}_5\text{FeSi}$  [69]”.*

Doktorant w ogóle nie wykonał obserwacji mikrostruktury próbek po obróbce cieplnej T5. Analizę tej części wyników ograniczył do stwierdzenia, że ilość złomu obiegowego oraz obróbka cieplna nie wpływają na skład chemiczny oraz wymagane właściwości mechaniczne. Podejrzewam, że firma nie była zainteresowana tego typu badaniami, jednak Doktorant powinien wykazać większą dociekliwość i zainteresowanie wyjaśnieniem tych zagadnień, co z pewnością podniosłoby walory naukowe pracy.

W drugim etapie badań mgr inż. Mariusz Lewandowski podjął się sprawdzenia wpływu poziomu ciekłego stopu w piecu podgrzewczym (100% i 15% objętości komory pieca) w czasie odlewania oraz przestojów w produkcji wynikających z planowanych przeglądów, lub przestojów awaryjnych. Badania prowadził dla wytopu zawierającego 70% złomu obiegowego. Jak wykazał

Doktorant, wartość indeksu gęstości oraz skład chemiczny próbek pobranych z pieca podgrzewczego, w którym w momencie pobierania było 100% lub 15% ciekłego stopu, są porównywalne dla obydwu przypadków wypełnienia. Zaobserwował natomiast wzrost zawartości ołowiu z 0,03 % do 0,07 %, w przypadku próbki pobranej z pieca wypełnionego w 15%. Pozostałe pierwiastki były na podobnym poziomie. Wykonał także badania właściwości mechanicznych i ustalił, że wytrzymałość na rozciąganie  $R_m$  i wydłużenie względne  $A_5$  partii odlewów wyprodukowanych przy 100% wypełnieniu pieca wynoszą odpowiednio  $R_m = 214-222\text{MPa}$  oraz  $A_5 = 1,10-1,26\%$  i spełniają wymagania Klienta. Natomiast próbki pobrane z pieca podgrzewczego, w momencie gdy poziom ciekłego stopu wynosił ~15%, nie spełniały założonych wymagań odnośnie właściwości mechanicznych.

Pan mgr inż. Mariusz Lewandowski przeprowadził obserwacje mikrostruktury z obydwu wariantów wytopów (100 i 25% ciekłego stopu) i nie stwierdził istotnych różnic w mikrostrukturze. Uważam, że to stwierdzenie jest zbyt pochopne, ponieważ moim zdaniem Doktorant nie przeprowadził należytej analizy mikrostruktury tych próbek. W pracy zamieścił jedynie po jednym zdjęciu z każdego wariantu, które moim zdaniem nie pozwalają na postawienie takiego wniosku. Podobnie jak w przypadku pierwszego etapu badań, po lekturze tego fragmentu pracy pozostaje duży niedosyt. Ponadto analizę ilościową składników fazowych mikrostruktury ograniczył tylko do wyznaczenia objętości względnej cząstek ołowiu, pomijając zupełnie wydzielenia krzemu eutektycznego, czy pozostałych faz międzymetalicznych, które bez wątpienia mają także wpływ na właściwości mechaniczne odlewów. Po raz kolejny wspomnę, że badania te podniosłyby wartość naukową recenzowanej pracy.

Należ jednak podkreślić w tym miejscu, że metodyczne podejście Doktoranta do prowadzenia badań pozwoliło wstępnie zidentyfikować przyczynę obniżenia właściwości mechanicznych odlewów wysokociśnieniowych ze stopu  $\text{AlSi9Cu3(Fe)}$ . Ustalił, że liczba cząstek oraz objętość względna cząstek zawierających ołów jest większa w przypadku próbek pobranych pod koniec próby, gdy poziom ciekłego stopu w piecu podgrzewczym był bliski dna pieca ~15%, co przełożyło się na spadek właściwości mechanicznych poniżej poziomu wymaganego przez Klienta. Doszedł do stwierdzenia, że bardzo istotne znaczenie dla stabilności właściwości mechanicznych odlewów wysokociśnieniowych ze stopu  $\text{AlSi9Cu3(Fe)}$  ma poziom ciekłego stopu w piecu.

Identyfikacja przyczyn otrzymywania obniżonych, niestabilnych właściwości mechanicznych odlewów ze stopu  $\text{AlSi9Cu3(Fe)}$  umożliwiła Autorowi przygotowanie założeń projektowych (rozdział „8.3 Założenia projektowe”) mających na celu redukcję wpływu ciężkich pierwiastków stopowych na właściwości wytrzymałościowe oraz wybranie i zaproponowanie rentownego dla firmy rozwiązania i zmian w procesie technologicznym, zapewniających uzyskanie wymaganych właściwości mechanicznych. Rozwiązania te bazujące na dotychczasowych wynikach, analizie literatury, wewnętrznych rozwiązaniach technologicznych oraz kalkulacjach zostały w pracy zestawione w formie tabelarycznej. Na tej podstawie mgr inż. Mariusz Lewandowski uwzględnił w projekcie nowego systemu dozowania ciekłego stopu wszystkie parametry, jakie powinny go cechować aby zapewnić uzyskanie założonych wymagań, głównie właściwości mechanicznych. Po przeanalizowaniu ofert różnych rozwiązań proponowanych na rynku, zdecydował się na nowatorski system podciśnieniowego dozowania ciekłych stopów aluminium AVD - Aluminium Vacuum Dosing, który umożliwia precyzyjne pobieranie stopu z określonej powierzchni – z pominięciem strefy powierzchniowej oraz dolnej pieca. Ponadto jak

wskazał Autor cały cykl nowego systemu dozowania ciekłego stopu jest kontrolowany w 5 etapach (pozycjonowanie zbiornika, proces napełniania, transport do i z pieca oraz dozowanie) i takie rozwiązanie systemu spełniające główne założenie projektu, zostało przez firmę Nemark Polska zaakceptowane. Doktorant czynnie uczestniczył w projektowaniu, instalowaniu oraz weryfikacji w praktyce przemysłowej nowego systemu podciśnieniowego dozowania ciekłych stopów aluminium (AVD - Aluminium Vacuum Dosing). Na uznanie zasługuje fakt, że Doktorant wykorzystał stanowiące wyposażenie firmy urządzenie z automatyczną łyżką dozującą i w miejsce automatycznej łyżki zalewowej, zamontował czerpak do podciśnieniowego dozowania stopu o pojemności 40 kg. Zmiana systemu z łyżki automatycznej na nowy system nie wymagała żadnej zmiany konstrukcyjnej pieca, ani lokalizacji w obrębie komory strzałowej, co zdecydowanie ograniczyło koszty przedsięwzięcia.

W 3-cim, ostatnim etapie badań Doktorant poddał nowy, wdrożony system dozowania ciekłego stopu weryfikacji w warunkach przemysłowych - seryjnego odlewania obudowy korpusu (bloku) silnika spalinowego ze stopu aluminium EN AC-46000 (AlSi9Cu3(Fe)). Z sukcesem zweryfikował nowe rozwiązanie konstrukcyjne uzyskując w każdej z pięciu niezależnych partii wytopów po 23 odlewy ciśnieniowe. Wszystkie odlewy zawierały maksymalną, dopuszczalną ilość złomu obiegowego (70%) i spełniały minimalne wymagania Klienta dla wytrzymałości na rozciąganie  $R_m$  oraz wydłużenie  $A_5$ .

Należy wyrazić uznanie dla metodycznego podejścia Doktoranta do realizacji zaplanowanych w eksperymencie zadań oraz na bieżąco prowadzonej weryfikacji. Takie podejście Autora umożliwiło zarekomendowanie firmie „nowego procesu technologicznego”, ze wskazaniem na konkretne czynniki, które należy podczas procesu odlewania kontrolować w celu zapewnienia stabilnych, powtarzalnych właściwości mechanicznych odlewów. Jest to szczególnie ważne zwłaszcza w aspekcie obniżenia kosztów produkcji oraz wymagań środowiskowych i gospodarki odpadami - odzysk i recykling materiałów. Zużycie energii również stanowi istotny czynnik środowiskowy, im mniejsza jest liczba wadliwych odlewów, tym mniejsza ilość elementów przekazywanych do ponownego topienia.

Podsumowując tę część pracy uważam, że teza została udowodniona, a cele pracy zostały przez Doktoranta w dostatecznym stopniu osiągnięte. Autor określił wpływ dodatku złomu obiegowego w ciekłym stopie (20% i 70%) na mikrostrukturę i właściwości odlewów ciśnieniowych ze stopu AlSi9Cu3(Fe), określił wpływ zmiany poziomu ciekłego stopu w piecu podgrzewczym przy maszynie odlewniczej na właściwości wytrzymałościowe oraz mikrostrukturę odlewów wysokociśnieniowych i w końcu, z powodzeniem zaprojektował i wdrożył nowy system podciśnieniowego dozowania ciekłych stopów aluminium.

#### 4.4. Uwagi krytyczne i szczegółowe

Czytając recenzowaną pracę odnosi się wrażenie, jakby pisana była w pośpiechu i w wielu jej fragmentach nie była ponownie sprawdzona, w celu korekty niedociągnięć i błędów. W tekście występuje bardzo dużo błędów zarówno merytorycznych, jak i językowych. Poniżej kilka wybranych przykładów:

1. Tytuły niektórych rozdziałów i podrozdziałów są niezrozumiałe, źle sformułowane i trudno po ich przeczytaniu domyślić się jakie treści będą zawierały, np.:
  - Podrozdział „2.1.1 Zarys technologii” – zarys technologii jakiej?



- Podrozdział „2.1.2 Ogólna zasada działania, zalety i wady” – działania czego?
- Podrozdział „2.2.1 Ogólny proces dozowania – opis etapów” – dozowania czego? Powinno być „2.2.1 Ogólny proces dozowania ciekłego metalu – opis etapów”. Podobnie podrozdział 2.2.2
- Podrozdział „2.3.4 Mikrostruktura stopu EN AC-Al Si9Cu3(Fe) odlewu ciśnieniowego” – lepiej byłoby np.: Mikrostruktura stopu EN AC- $AlSi_9Cu_3(Fe)$  w odlewach ciśnieniowych
- Podrozdział „8.3.2 Automatyczna łożka zalewowa i ograniczenia”

2. W pracy występuje bardzo dużo błędów stylistycznych często utrudniających zrozumienie przedstawianych treści, przykłady:

- „Ilość komponentów ze stopu aluminium może wynosić w aucie ponad 30 % masy”
- „Rezultatem projektu w 2015 roku była redukcja masy samochodu o 23.5 % w porównaniu do masy wyjściowej.”
- „Nowa konstrukcja była zbliżona do poprzedniej wersji produkowanej już jednostki w Firmie.”

3. Ponadto Doktorant stosuje skróty myślowe, które utrudniają czytelnikowi zrozumienie przekazywanych w pracy treści. Oczywiście jest, że Autor wie co ma na myśli, czytelnik niekoniecznie! Wiele zdań jest sformułowanych nieskładnie, niegramatycznie. Dodatkowo w pracy pojawiają się bardzo długie, kilkuwersowe zdania, bez znaków interpunkcyjnych – głównie przecinków, co nie sprzyja lekturze dysertacji. Poniżej kilka wybranych przykładów:

- Str. 9 – „Weryfikacja efektów zrealizowanych projektów konstrukcyjnych, z uwzględnieniem wymagań norm wewnętrznych dotyczących udziału wyselekcjonowanego złomu obiegowego we wsadzie, wykazała że, stabilne osiągnięcie wymaganego poziomu właściwości wytrzymałościowych odlewów wysokociśnieniowych korpusów silników spalinowych ze stopu  $AlSi_9Cu_3(Fe)$ .”
- Str. 52. - „Próbki pobierano po zakończeniu przygotowania ciekłego stopu w piecu topialnym i z pieca podgrzewczego przed rozpoczęciem procesu odlewania.”
- „Z ostatnich obiecujących perspektyw jakie ukazało odlewnictwo ciśnieniowe dla branży motoryzacyjnej jest odlewanie całej konstrukcji nośnej pojazdu w czasie jednego wtrysku ciekłego stopu do wnęki formy - wnioszek patentowy firmy Tesla z 2019 roku.”

#### 4. Inne

- Niewłaściwa kolejność powoływania się na rysunki w tekście. Doktorant najpierw powołuje się na rys. 22, a później 21 „występują fazy:  $\theta-Al_2Cu$  (Rys. 22),  $Al_5Mg_8Cu_2Si_5$  (Rys. 21)”
- Rys. 28. b - Chyba zamieniono opisy osi
- Autor wielokrotnie, przedstawiając wyniki badań np. mikroskopowych, nie stosuje przyjętej zwyczajowo numeracji rysunków. Zamieszczając np. dwa lub cztery różne zdjęcia mikrostruktury tej samej próbki wykonane przy różnych powiększeniach, lub zdjęcie i widmo promieniowania rentgenowskiego EDS, stosuje oznaczenie a dla dwóch zdjęć, bądź a, b dla czterech, przykłady: Rys. 54, 55, 56, 57, 58

#### Uwagi literowe i edycyjne:

Liczba tych usterek w pracy jest bardzo duża. Uchybienia te nie stanowią bynajmniej błędów merytorycznych, niemniej jednak są tak liczne, że w pracy trudno znaleźć jedną stronę pozbawioną tego typu błędów. Niestety obniża to pozytywny odbiór rozprawy przez czytelnika, pozostawiając

wrażenie niedbalstwa. Nie będę wszystkich tych błędów zamieszczała w recenzji, ponieważ zajęłoby to wiele stron. Poniżej podaję przykłady:

- „*jest produkowaną tą*” – powinno być: *jest produkowanych* (str. 10);
- „*jest w najczęściej w sekundach*” – powinno być: *jest najczęściej w sekundach* (str. 12);
- „*Do najważniejszy zalicza się:*” – powinno być: *najważniejszych* (str. 13);
- „*sposobie wypełnienia wnęki*”; „*sposobie ryglowania*” – powinno być: *sposobu* (str. 13);
- „*technologie gorąco- oraz*” – powinno być: *technologię* (str. 14);
- „*Umożliwia stosowania stopów*” – powinno być: *stosowanie* (str. 15);
- „*Najpowszechniejsza technologia*” – – powinno być: *Najpowszechniejszą* (str. 16);
- „*oferują różnicowane systemu wchodzące*” – powinno być: *systemy* (str. 16);
- „*ułatwienie oddzielenie odlewu od formy*” – powinno być: *oddzielenia* (str. 16);
- „*automatyczna wyjmowanie odlewu*” – powinno być: *automatyczne* (str. 16);
- „*przez instytucję badawczo-naukowe.*” – powinno być: *instytucje* (str. 20);
- „*właściwości*” zamiast *właściwości*; „*sprzyja tworzenie fazy*” zamiast *tworzeniu fazy*; „*ryzyko powstawanie*” zamiast *ryzyko powstawania* (str.28);
- „*Jednakże może razem z Fe może powodować*” (str.28);
- „*Pełnią funkcje modyfikatorów*” – powinno być *funkcję* (str.28);
- „*Rys. 24. Wydzielenia fazy  $\alpha$   $\beta$ -Al<sub>5</sub>FeSi*” – powinno być: *fazy  $\beta$*  (str. 29);
- „*Składa się ona dendrytów roztworu stałego*” – powinno być: *z dendrytów* (str. 29);
- „*bazując na dotychczasowych doświadczeniu*” – powinno być: *dotychczasowym* (str. 34);
- „*poziomu ciekłego stopu w piec*” – powinno być: *w piecu* (str. 75);
- „*seryjnej produkcji dla lat 2017, 2018, 2019*” - zamiast *w latach 2017-2019* (str. 42 i 43);
- „*Obróbkę cieplną bloków przeprowadzono na piecu*” – powinno być *w piecu* (str. 52);
- „*do statyczną próbę rozciągania*” – zamiast *statycznej próby rozciągania* (str. 54);
- „*w składzie chemicznym oraz indeksem gęstości*” – powinno być: *indeksie* (str. 68).

Takich przykładów można do końca pracy podać jeszcze więcej, jednak zajęłoby to kolejne strony recenzji. Doktorant stosuje również znaki interpunkcyjne w niewłaściwym miejscu lub nie stosuje ich wcale np.: „*Mniejsze ciśnienia. Prasowania*”; „*wydzieniowego*. [49, 67, 68].”

### **Inne drobne uwagi:**

Podpisy pod rysunkami i schematami bardzo często są niezrozumiałe i nieadekwatne do informacji na nich przedstawionych, kilka przykładów:

- „*Rys.3. Ilość złomu w produkcji odlewów aluminium wynosząca nawet ~80%. Uproszczenie logistyczne związane z przetapianiem elementów zakwalifikowanych jako złom w porównaniu do elementów wyciskanych [23].*”

„*Rys. 6. Porównanie ciśnienia odlewania do prędkości w szczelinach formy odlewniczej dla określonych technologii odlewania stopów metali [36].*”

„*Rys. 48. Lokalizacja próbek wytrzymałościowych w korpusie bloku silnika spalinowego.*”

Doktorant stara się posługiwać specjalistyczną terminologią, jednak nie unika również żargonu, np.:  
rys. 62. „*Pobieranie próbki na skład chemiczny*”

Str. 75. „*Zauważalny jest trend spadku właściwości mechanicznych*”

Str. 75. „*...brak jakiegokolwiek ruchu mieszającego...*” – co to oznacza

## Uwagi merytoryczne i dyskusyjne

1. Str. 28. – Proszę wyjaśnić co oznacza termin „zjawisko solderingu”?
2. Str. 34. – „Skuteczne wdrożenie projektu ..... Powyższe zagadnienia stanowią główną tematykę pracy dyplomowej.” – pracy dyplomowej czy doktorskiej?
3. Doktorant stosuje zamiennie termin struktura i mikrostruktura, w odniesieniu do mikrostruktury badanego stopu AlSi9Cu3(Fe). Termin struktura powinien być używany w odniesieniu do struktury krystalicznej materiału. Jednakże w literaturze fachowej bardzo często obydwa terminy stosowane są zamiennie i można polemizować czy słusznie. Doktorant pretenduje jednak do uzyskania stopnia naukowego doktora w dyscyplinie inżynieria materiałowa, więc moim zdaniem poprawny termin, którym powinien się posługiwać w swojej pracy to mikrostruktura. Ponieważ poprzez zmianę np.: składu chemicznego stopów czy przemiany fazowe zachodzące podczas obróbki cieplnej możemy spowodować w materiale zmianę zarówno struktury jak i mikrostruktury materiału. W takich przypadkach zastosowanie odpowiedniej terminologii jest kluczowe. Przy lekturze recenzowanej dysertacji takich przykładów jest wiele, jednak przytoczę jeden ze str. 48, na której Doktorant przedstawia cele pracy. W celu naukowym używa terminu struktura, natomiast w celu technologicznym mikrostruktura:
  - „• Cel naukowy: określenie wpływu złomu obiegowego w ciekłym stopie (20% i 70%) na strukturę i właściwości odlewów ciśnieniowych ze stopu AlSi9Cu3(Fe).
  - Cel technologiczny: określenie wpływu zmiany poziomu ciekłego stopu w piecu podgrzewczym przy maszynie odlewniczej na właściwości wytrzymałościowe oraz mikrostrukturę odlewów wysokociśnieniowych.”
4. Doktorant używa w pracy sformułowania mikrostruktura i właściwości ciekłego stopu, przykład (str. 47) „Ewaluacja na podstawie modelu produkcyjnego wykazała, że próby poprawienia jakości ciekłego stopu, w tym szczególnie mikrostruktury oraz właściwości mechanicznych, powinny być skupione na dwóch newralgicznych etapach produkcyjnych” – od kiedy stop w stanie ciekłym posiada mikrostrukturę i właściwości mechaniczne?
5. W części teoretycznej pracy (str. 29), w podpisie pod rysunkiem 21 Autor napisał „Wydzielenia fazy  $Al_5Mg_8Cu_2Si_5$  w stopie, a) SEM i b) EDS [71]” – po pierwsze oprócz tej fazy na rysunku widoczne są wydzielenia jeszcze czterech innych faz międzymetalicznych ( $Al_2Cu$ ,  $\alpha-Al_{15}(FeMn)_3Si_2$ ,  $\beta-Al_5FeSi$ ,  $\pi-Al_8Mg_3FeSi_6$ ), po drugie nie ma tam rys. 29 b, który przedstawiałby widmo promieniowania rentgenowskiego EDS.
6. Wydzielenia zaznaczone na rys. 24 strzałkami to nie jest faza  $\beta-Al_5FeSi$ , wydzielenia tej fazy mają kształt płytkowy lub iglasty – być może strzałki się przesunęły?
7. Str. 75 - „Cząstki ołowiu mają niższą temperaturę topnienia niż aluminium, więc w temperaturze cięcia cząstki te topią się i zmniejszają tarcie.” – co to jest temperatura cięcia?
8. Str. 75 - „Przestój pieca z ciekłym stopem, brak jakiegokolwiek ruchu mieszającego, niski poziom stopu oraz niska temperatura stopu  $660\pm 5$  °C spowodowały zwiększenie udziału objętościowego cięższych, cząstek ołowiu.” – te czynniki nie mogą wpłynąć na zwiększenie objętości względnej cząstek ołowiu w stopie. Taki styl pisania wprowadza niepotrzebną dyskusję i wątpliwości. Ta większa

objętość względna ołowiu jest w stopie, który zlokalizowany jest w dolnej strefie pieca. Trzeba było na końcu zdania dodać takie sformułowanie.

9. Str. 68. „*Uzyskane właściwości mechaniczne przy maksymalnym udziale złomu obiegowego spełniają nowe wymagania Klienta  $R_m > 200$  MPa oraz  $A_5 > 1\%$  w danym eksperymencie.*” Oraz str. 70 – „*Zarówno wytrzymałość na rozciąganie, jak i wydłużenie w końcowym etapie eksperymentu nie spełniają nowych wymagań Klienta  $R_m > 200$  MPa oraz  $A_5 > 1\%$  (Rys. 63).*” – proszę jednoznacznie określić jakie są wymagania Klienta? Ponieważ na rys. 28, 53, 61 i 63 oraz wielokrotnie w tekście pracy Doktorant pisze, że nowe wymagania Klienta dla odlewów wysokociśnieniowych bloku silnika samochodowego to  $R_m = 210$  MPa i  $A_5 \geq 1\%$ . Które wartości są właściwe?
10. Doktorant na podstawie obserwacji mikroskopowych potwierdził obecność porowatości skurczowej i gazowej w odlewach, co jest częstym problem tej techniki odlewniczej i wpływa na pogorszenie właściwości mechanicznych. Autor wymienił przyczyny jej powstawania sposoby redukcji, czy minimalizacji. Moje pytanie brzmi: czy Autor wie jaka jest dopuszczalna % zawartość porów w produkowanych w firmie Nemark Polska odlewach, która nie wpłynie znacząco na właściwości badanego stopu? oraz czy wie jaka była objętość względna porowatości w badanych odlewach?
11. Wyniki badań otrzymane w części eksperymentalnej dotyczącej wpływu zastosowanej obróbki cieplnej T5 - wg wymagań Klienta, na właściwości mechaniczne stopu wykazały, że nie ma ona w zasadzie żadnego wpływu na ich zmianę. Zastanawia mnie jaki jest więc sens prowadzenia tej obróbki cieplnej odlewów? Czy istnieje jakieś uzasadnienie tego zabiegu? Czy być może inne parametry wytrzymałościowe, których nie badano w pracy ulegają poprawie?
12. Dlaczego nie przeprowadzono obserwacji mikroskopowych próbek po obróbce cieplnej? Czy jest Pan w stanie odpowiedzieć na pytanie jakie zmiany mogły nastąpić w mikrostrukturze stopu AlSi9Cu3(Fe) wskutek zastosowanych zabiegów oc?
13. „*Nowatorstwo przeprowadzonych badań polega na wykorzystaniu ilościowych i jakościowych metod badań struktury, które umożliwiły zidentyfikowanie, a następnie rozwiązanie problemu, jakim były niewystarczające właściwości mechaniczne stopu.*” – zastanawiam się co jest nowatorskiego w wykorzystaniu ilościowych i jakościowych metod badań mikrostruktury?

### **Podsumowanie i wnioski końcowe**

W końcowej opinii chciałabym podkreślić, że pomimo przedstawionych uwag, uważam recenzowaną rozprawę doktorską mgr inż. Mariusza Lewandowskiego pt.: „*Wpływ parametrów odlewania i obróbki cieplnej na kształtowanie struktury i właściwości mechanicznych odlewów ciśnieniowych bloku silnika samochodowego*” za podejmującą istotne, współczesne wyzwania naukowe, techniczne oraz technologiczne w obszarze inżynierii materiałowej. Pozytywnie oceniam Jego metodyczne podejście do analizy wszystkich etapów procesu technologicznego odlewania wysokociśnieniowego bloku silnika samochodowego ze stopu AlSi9Cu3(Fe) oraz identyfikację przyczyn niestabilności mikrostruktury i właściwości mechanicznych odlewów. Doktorant nie tylko zdiagnozował problem, ale również zaproponował zmodyfikowaną technologię odlewania, która wyeliminowała te przyczyny.

Do kluczowych osiągnięć mgr inż. Mariusza Lewandowskiego należy bez wątpienia Jego wkład w zaprojektowanie i wdrożenie innowacyjnego, podciśnieniowego systemu dozowania ciekłego stopu AlSi9Cu3(Fe) do komory prasowania maszyny odlewniczej. Opracowane

rozwiązanie konstrukcyjne ograniczyło negatywny wpływ Pb, umożliwiając uzyskanie stabilnych, spełniających wymagania Klienta właściwości mechanicznych. Twórczy wkład Doktoranta świadczy o jego wiedzy i kompetencjach niezbędnych do zaprojektowania i realizacji opisanych rozwiązań technologicznych. Jakość i praktyczna użyteczność tych rozwiązań potwierdzają przedstawione w pracy przykłady ich wdrożenia z pozytywnym rezultatem.

Pomyślna realizacja rozprawy doktorskiej wymagała od Autora opanowania wiedzy teoretycznej z zakresu wysokociśnieniowego odlewania stopów aluminium, precyzyjnego zaplanowania oraz przeprowadzenia eksperymentów z wykorzystaniem odpowiednio dobranej aparatury badawczej, a także umiejętności prowadzenia badań naukowo-technicznych i wyciągania trafnych wniosków.

**W mojej ocenie, przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Mariusza Lewandowskiego spełnia formalne wymagania określone ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574, z późniejszymi zmianami). W związku z tym wnioskuję do Wysokiej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Materiałowa Politechniki Śląskiej o przyjęcie pracy, przeprowadzenie dalszych etapów postępowania doktorskiego oraz dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.**